



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Spectroscopy and nuclear dynamics of starburst galaxies

Vermaas, L.

Citation

Vermaas, L. (2012, January 11). *Spectroscopy and nuclear dynamics of starburst galaxies*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/18332>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/18332>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Nederlandse samenvatting:

Spectroscopie en centrale dynamica van starburst-stelsels

1. Sterrenstels/melkwegstelsels (galaxies)

Een sterrenstelsel is een enorme verzameling van sterren, zo'n paar honderd miljard, die in een bepaalde vorm bij elkaar horen. Naast sterren bevatten deze stelsels ook (waterstof-)gas en stofdeeltjes. Onze Melkweg is ook een sterrenstelsel; daarom worden sterrenstelsels ook wel melkwegstelsels genoemd. Er zijn grofweg twee vormen: spiraalstelsels en elliptische stelsels.

Spiraalstelsels zijn opgebouwd uit een platte schijf van gas en sterren, waarbij de materie duidelijk in spiraalvorm geconcentreerd is, dit kunnen 2 of meer spiraalarmen zijn. Meestal bevat een spiraalstelsel in het midden ook een bolvorm met wat oudere sterren, terwijl nieuwe stervorming in de spiraalarmen plaatsvindt. De Melkweg is een spiraalstelsel. De zon met het zonnestelsel bevindt zich aan de buitenkant iets tussen twee spiraalarmen.

Elliptische stelsels hebben de vorm van een bol die meer of minder afgeplat is. Er vindt in elliptische stelsels minder stervorming plaats en ze zijn over het algemeen ouder dan spiraalstelsels. Een gangbare theorie stelt dat elliptische stelsels ontstaan door botsingen tussen spiraalstelsels, dit kunnen botsingen zijn tussen grote stelsels of tussen kleine stelsels, of een groot stelsel dat op zijn weg steeds kleine stelseltjes is tegengekomen.

De meeste sterrenkundigen zijn het erover eens dat deze stelsels naast sterren, gas en stof ook donkere materie moet bevatten, dit zou zelfs het grootste deel van hun massa uitmaken, zo'n 90%. De belangrijkste aanwijzing hiervoor is gebaseerd op de wetten van Newton: op een bepaald punt eindigt de zichtbare materie van een (spiraal-)stelsel, maar verder naar buiten wordt wel de invloed van massa (zwaartekracht) opgemerkt. Deze massa loopt zelfs ver door buiten het deel van het stelsel dat sterren bevat. Er zijn theorieën die dit (en andere verschijnselen) zonder donkere materie proberen te verklaren, maar die hebben tot nu toe geen bevredigende resultaten opgeleverd. Waar de donkere materie uit bestaat is nog onduidelijk.

2. Starburst-stelsels

Sterren worden gevormd uit koude wolken van waterstofgas, die ook stofdeeltjes bevatten. Meestal gebeurt dit in de spiraalarmen van spiraalstelsels op een rustig tempo van 1 zons-

massa (de massa van de zon) per jaar voor het hele stelsel. In het geval van een starburst-stelsel kan dit 10-100 zonsmassa's per jaar zijn, en in het geval van extreme starbursts wel 100-1000 zonsmassa's per jaar, zoals in de ULIRGs die hieronder worden beschreven. Bij deze mate van stervorming wordt het beschikbare gas in hoog tempo opgebruikt en daarom kan dit maar een beperkte tijd aanhouden, zo'n 10 miljoen tot 100 miljoen jaar. De stervorming in verhoogd tempo kan zich verspreid voordoen over het hele stelsel, maar meestal is het geconcentreerd in een relatief klein gebied van een paar honderd tot duizend lichtjaar rond de kern van het stelsel (ter vergelijking: de diameter van de Melkweg, het gedeelte waar zich sterren bevinden, is ongeveer 100.000 lichtjaar).

Een starburst wordt meestal veroorzaakt door de interactie met een ander sterrenstelsel. De directe aanleiding van de starburst is het botsen van gaswolken op elkaar, wat twee oorzaken kan hebben. Ten eerste kan het zo zijn dat de wolken binnen een stelsel onderling botsen omdat een naburig stelsel het zwaartekrachtsveld zo verstoort dat hun beweging is veranderd. In het tweede geval zijn de twee sterrenstelsels daadwerkelijk op elkaar gebotst en komen de gaswolken van de één met die van de ander in botsing. In dit laatste, spectaculaire geval komt het zelden voor dat de *sterren* van de stelsels ook met elkaar botsen, omdat de afstanden tussen de sterren zo groot zijn, maar de sterren hebben wel grote invloed op het zwaartekrachtsveld.

3. Dit proefschrift

Het doel van dit werk is inzicht verwerven in starbursts en de bijbehorende dynamische processen. De bestudering van het spectrum, de onderverdeling van het licht bij verschillende golflengtes, is hiervoor heel handig. Een spectraal-lijn betekent dat er bij een nauwkeurig bepaalde golflengte krachtig wordt uitgezonden. De golflengte waarbij dit gebeurt geeft de aanwezigheid van een specifiek element of specifieke stof aan, de sterkte van de lijn vertelt iets over de hoeveelheid van deze stof en de verschuiving in golflengte van de lijn geeft aan wat de snelheid is. Een aantal bekende lijnen in het spectrum geven verschillende stadia van stervorming aan: Brackett-gamma (een atomaire waterstoflijn) en heliumlijnen voor recente stervorming, ijzer voor supernova-resten en moleculair waterstof voor schokgolven of stervormingsgebieden. Aan de hand van spectra van starbursts, is duidelijk dat er behalve 'gemiddelde' sterren zoals de zon, ook hele grote, massieve sterren worden gevormd die zo'n $100\times$ zwaarder zijn dan de zon. Deze sterren zenden licht uit met veel energie in het ultraviolet (UV, korte golflengte), maar veel van juist dit licht wordt tegengehouden door stofkorrels die in grote hoeveelheden voorkomen in stervormingsgebieden. Deze stofkorrels absorberen dit ultraviolette licht, warmen daardoor op en zenden zelf weer licht uit met een langere golflengte die past bij hun temperatuur: in het infrarood. Tussen het ultraviolet en het infrarood ligt nog het optische gebied: het voor onze ogen zichtbare licht. In dit optische gebied, samen met het nabij-infrarood (een klein gedeelte van het infrarood dat daarbij aansluit) wordt licht waargenomen dat direct van sterren afkomstig is.

Met behulp van een techniek genaamd 'integral field'-spectroscopie is het mogelijk om waarnemingen te doen waarbij op elke pixel van het plaatje een spectrum beschikbaar is.

Hierdoor kan goed onderscheiden worden op welke locatie zich welke processen afspelen, en met twee-dimensionale snelheidsvelden kunnen bewegingen goed in kaart gebracht worden. Dit is een grote vooruitgang ten opzichte van de in het verleden veel gebruikte ‘slit’ spectroscopie. Hierbij worden spectra waargenomen door een spleet-vorm over het stelsel te leggen, waardoor ruimtelijke informatie verloren gaat of verborgen blijft. Voor de snelheidsvelden was het daarbij vaak moeilijk de richting en precieze snelheden te bepalen. Alle waarnemingen in dit proefschrift zijn gedaan met integral field spectroscopie, door gebruik van het instrument SINFONI (Spectrograph for INtegral Field Observations in the Near InfraRed), dat gemonteerd zit op één van de vier telescopen van de Very Large Telescope (VLT) op mount Paranal in Chili.

De spiegels van deze telescopen die het licht uit de ruimte opvangen hebben alle een diameter van 8.2 meter, en elke spiegel bestaat uit 150 beweegbare deeltjes. Deze losse delen zorgen ervoor dat de spiegel kan corrigeren voor verstoringen in de aardatmosfeer, waardoor de kwaliteit van de waarnemingen verbetert. Met behulp de Laser Guide Star, die sinds 2007 beschikbaar is op dezelfde telescoop als waar SINFONI aan vast zit, kan de kwaliteit met dit systeem nog verder worden verbeterd. Hiervoor wordt vanuit de koepel een zeer sterke laserstraal de lucht in gestuurd in de richting van het te observeren object. Deze straal reikt tot 90 km hoogte, waar hij zorgt dat het natrium dat zich daar bevindt licht uitzendt. Dit licht wordt weer waargenomen, en aan veranderde eigenschappen kan men zien welke verstoringen zijn opgetreden in de atmosfeer van de aarde. Deze informatie wordt razendsnel doorgegeven aan de beweegbare spiegeldeeltjes die direct van richting veranderen en corrigeren. Dit heet adaptieve optica (‘Adaptive Optics’). Hiervoor kan ook licht van een ster worden gebruikt, maar er is niet altijd een geschikte ster beschikbaar in de buurt van het te observeren object, en de Laser Guide Star biedt dan uitkomst.

Hoofdstuk 2: het starburst-stelsel M83 We selecteerden een spiraalstelsel met een starburst in de kern dat heel dichtbij staat (op een afstand van 15 miljoen lichtjaar): M83. Vanwege de nabijheid hebben we hoge resolutie en kunnen we verschillende processen in het kerngebied nauwkeurig in kaart brengen. Wat hierbij opvalt is dat de voornaamste starburst zich bevindt op een locatie die een stuk uit de buurt van het cluster van sterren dat werd geacht de kern van het stelsel te zijn (de optische piek). Supernova-resten, die aangeven waar stervorming in het verleden heeft plaatsgevonden, werden juist over het hele gebied verspreid aangetroffen. Wat betreft de dynamica komt het centrum van het snelheidsveld ook niet overeen met de optische piek. Het snelheidsveld van het gas laat een ronddraaiende gasring zien, terwijl de sterren in dit gebied weer een ander patroon volgen. Onze conclusie is dat deze starburst werd veroorzaakt door een algehele instabiliteit van het hele kerngebied.

Hoofdstuk 3, 4 en 5: Stelsels met extreme infrarood-straling (ULIRGs) *Ultraluminous infrared galaxies* (ULIRGs) vormen een klasse sterrenstelsels met de gezamenlijke eigenschap dat ze zeer helder zijn in het infrarood. Een stelsel is een ULIRG als hij minstens een infrarood-lichtkracht heeft die 1 biljard (10^{12}) keer zo sterk is als de zon. Maar deze stelsels blijken meer gemeen te hebben: bijna alle ULIRGs zijn het (eind)product van bot-

sende stelsels, ze bevatten grote hoeveelheden moleculair gas, en de infraroodstraling wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door stervorming die kan oplopen tot een snelheid van 100-1000 zonsmassa's per jaar. Een theorie die al genoemd werd stelt dat uit zulke botsingen elliptische stelsels ontstaan; daarnaast is er een theorie die stelt dat deze botsingen een vaste volgorde doorlopen waarbij de verschillende stadia van de botsing de ULIRGs iets andere eigenschappen geven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen 'koele' en 'warme' ULIRGs, waarbij de 'warmte' bepaald wordt door verhouding tussen sterkte in lichtkracht aan de ene (korte-golflengte) en andere (lange-golflengte) kant van het infrarode spectrum. De warme ULIRGs hebben compactere kernen en stralen sterker dan de koele ULIRGs. Volgens de theorie zouden ULIRGs evolueren van koel naar warm en uiteindelijk zal het stelsel eruit zien als een zogenaamd Quasi-Stellair Object (een actief zwart gat).

Een mogelijk scenario is dat, terwijl het gas snel naar het centrum van de botsing stroomt en daar een starburst veroorzaakt, in het centrum van de botsing tegelijkertijd een zwart gat ontstaat. Beide processen gebruiken het gas, de starburst door er sterren van te vormen en het zwarte gat door het op te slokken en zo aan te groeien (dit wordt ook wel een actieve kern genoemd, of Active Galactic Nucleus, AGN). Op een gegeven moment wordt het zwarte gat zo groot dat het de stervorming tegenhoudt, het gas en stof die het licht van de actieve kern tegenhielden worden weggeblazen en deze kern wordt zichtbaar. In het begin van dit proces is er meer licht-absorberend stof en gas dat ervoor zorgt dat de ULIRG er koel uitziet, waarna dit opgebruikt en opgeslokt wordt zodat deze steeds warmer wordt. Tegelijkertijd groeien dus zowel de sterre-massa als het zwarte gat. Dit is interessant, omdat studies hebben aangetoond dat er een in elliptische stelsels een relatie bestaat tussen de massa van het centrale zwarte gat en de massa van de sterren, die dus op deze manier tot stand zou kunnen komen.

We hebben een zestal ULIRGs geselecteerd, van koel tot warm. Het doel was om te kijken of we sporen konden vinden van evolutie: kwalitatief door te kijken in welke mate het stadium van de botsing overeenkwam met de koelte/warmte, en kwantitatief door het snelheidsveld te bepalen en hieruit de massa en de massa/lichtkracht-verhouding te bepalen en daarmee de leeftijd. De ULIRG Arp 220 wordt apart gesproken, voornamelijk omdat dit stelsel ten opzichte van de andere ULIRGs erg dichtbij staat en daardoor in detail te bestuderen is.

Hoofdstuk 3: De meest dichtstbijstaande ULIRG, Arp 220 Dit is een koele ULIRG met een betrekkelijk kleine afstand van 250 miljoen lichtjaar. In het centrale deel van de botsing zien nog de twee afzonderlijke kernen van de oorspronkelijke stelsels (de sterren). In beide kernen vindt stervorming plaats, maar het snelheidsveld laat zien dat het moleculaire gas van de stelsels al is samengegaan en ronddraait in een enkele schijf. We hebben de massa binnen het waargenomen gebied bepaald door middel van twee onafhankelijke methodes. Eerst door een model te maken van het snelheidsveld van het gas, waarbij rekening is gehouden met een aandeel sterren en een aandeel gas. Vervolgens hebben we het snelheidsveld van de sterren ingevoerd in een model dat ook voor elliptische stelsels gebruikt wordt. Hoewel in dit geval beide ster-kernen nog zichtbaar zijn, komen de massa's zeer goed overeen. Hiernaast hebben we de verhouding tussen massa en lichtkracht gemeten, en deze gebruikt om de leeftijd van de starburst te bepalen. De massa/lichtkrachtverhouding (of M/L) in het nabij-infrarood die wij vonden is klein, veel kleiner dan bijvoorbeeld die van elliptische stelsels.

Hoofdstuk 4: Ster-dynamica van ULIRGs Op dezelfde manier als beschreven voor Arp 220, zijn voor 5 andere stelsels ook de snelheidsvelden van de sterren in kaart gebracht en is de massa bepaald met behulp van het elliptische stelsel-model. We vonden weer lage waarden voor de massa-lichtkrachtverhouding. Er werd geen verband gevonden tussen kleur en M/L .

Hoofdstuk 5: Gas-dynamica van ULIRGs In hoofdstuk 5 worden de snelheidsvelden van het gas beschreven van dezelfde stelsels als in hoofdstuk 4. Naast Arp 220, komen de massa's van 2 andere stelsels ook goed overeen met de bepalingen uit de sterodynamica, maar voor 3 stelsels vallen de waarden anders uit. Dit geeft aan dat beide methodes niet zonder meer gebruikt kunnen worden. We hebben uitgezocht welk model de voorkeur verdient, dit verschilt per stelsel om verschillende redenen. Weer vonden we geen verband tussen massa/lichtkracht-verhouding en kleur/warmte. Het is belangrijk bij zulke metingen de onzekerheden in het oog te houden: hierin beschouwen we twee grote factoren. Ten eerste is dit de mate waarin het licht wordt tegengehouden door bijvoorbeeld stofdeeltjes en gas (extinctie), waarbij we wel een poging doen deze te bepalen maar het zou kunnen zijn dat deze ruim onderschat wordt. Ten tweede is de orientatie van de draai-as van het snelheidsveld (de inclinatie) van belang, en die is moeilijk te bepalen. De inclinatie heeft invloed op de schatting van de massa, en de extinctie op de berekening van de lichtkracht. Deze onzekerheden in aanmerking genomen, zullen de gevonden waardes van M/L nog steeds laag zijn ten opzichte van de elliptische stelsels waar ze naartoe evolueren. We concluderen ook dat ULIRGs niet zullen evolueren tot grote elliptische stelsels, zoals wel werd beweerd, maar in elliptische stelsels van middelmatige omvang.

4. De toekomst van dit onderzoek

Er is nog veel te bereiken in deze onderzoeksrichting. In onze data zit nog veel informatie die we niet gebruikt hebben voor dit proefschrift. In de spectra van de ULIRGs zitten bijvoorbeeld verschillende spectraal-lijnen van moleculair waterstof die meer inzicht kunnen geven in de lokale omstandigheden. De voorgestelde evolutie van koele ULIRGs naar warme ULIRGs zal nog verder onderzocht moeten worden. De kracht van 'integral field'-spectroscopie (met adaptieve optica) is bij zulk onderzoek essentieel voor de kwaliteit van de resultaten. De volgende stap hierin is bijvoorbeeld het bepalen de verhouding tussen de massa van het gas en de massa van de sterren. Deze massa's hangen voornamelijk af van de eigenschappen van de afzonderlijke stelsels vóórdat deze in botsing kwamen, maar de verhouding $M_{\text{gas}}/M_{\text{sterren}}$ zou moeten afnemen omdat het gas wordt opgebruikt en nieuwe sterren worden gevormd. Het zou de moeite waard zijn om dit in de nabije toekomst te bestuderen voor een voldoende grote selectie van ULIRGs.

